

Методическое пособие для наставника

Интерактивный профориентационный программный комплекс «Технологии МЭМС» (Профориентационный комплекс) создан специалистами Цифровой интерактивной лаборатории Детского технопарка «Смарт-парк» Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» при сотрудничестве с индустриальным партнёром АО «Зеленоградский нанотехнологический центр» (ЗНТЦ) и при поддержке Фонда содействия инновациям.

Учащимся предоставляется возможность реализовать ключевые технологические операции на оборудовании ЗНТЦ в режиме виртуальной реальности. Перед выходом на виртуальное производство ребята проходят краткий ознакомительный курс, который дает им представление о применении микроэлектронных изделий, созданных по МЭМС-технологиям, принципе действия таких изделий и, наконец, о МЭМС-технологии производства этих изделий.

В рамках профориентационной программы создан интерактивный комплекс, состоящий из пяти модулей:

1. Мультимедийное пособие.
2. Интерактив «Конструирование МЭМС».
3. Интерактив-обучение «Технология МЭМС».
4. Интерактив-тестирование «Технология МЭМС».
5. Интерактив «VR - изготовление МЭМС на производстве».

Для того, чтобы воспользоваться интерактивным комплексом необходимо перейти по ссылке: <https://dt.miet.ru/mems/>.

Профориентационный комплекс может быть использован как в очной форме занятий, так и в дистанционном режиме. Рекомендуется использовать модули последовательно от первого до пятого по порядку слева направо.

Модуль «Мультимедийное пособие»

Кликните в меню «Мультимедийное пособие» и начните просмотр ролика. Роллик не содержит закадрового текста, так как подразумевается, что преподаватель или руководитель кружка комментирует фрагменты ролика во время занятий.

Первый фрагмент «Применение гироскопов на основе МЭМС в гироскутерах» демонстрирует работу системы стабилизации платформы гироскутера. Когда платформа начинает отклоняться от горизонтального положения, МЭМС-гироскоп непрерывно подаёт сигнал на силовой блок колеса пропорционально отклонению, который формирует

дополнительный момент на вал колеса для компенсации отклонения. В данном случае МЭМС-гироскоп используется как инерционный датчик положения. Рекомендуем остановиться на анимации мультимедийного пособия со схемой формирования управляющего сигнала компенсации отклонения и внимательно её проработать, чтобы ребята хорошо усвоили роль МЭМС-гироскопа в стабилизационных платформах.

Второй фрагмент мультимедийного пособия «Автомобильные системы» демонстрирует применение гироскопа и акселерометра в автомобилях. Акселерометр – это МЭМС-датчик ускорения. В этом фрагменте наглядно показан принцип работы акселерометра и формирования аналогового управляющего сигнала. Приведён пример срабатывания подушки безопасности при столкновении автомобиля с препятствием. Обратите внимание ребят на то, что размер чувствительного элемента микромеханического элемента МЭМС – 45 мкм, а МЭМС-микросхемы размером несколько миллиметров располагаются на печатных платах автомобильной электроники.

Третий фрагмент мультимедийного пособия «Технологические зоны и процессы» посвящен технологии изготовления МЭМС. Показаны шесть типовых микроэлектронных операций-процессов. Для каждого из процессов сначала демонстрируется анимация преобразований материалов при выполнении технологической операции, а затем технологическая производственная зона, в которой эта операция проводится.

Обратите внимание ребят на последовательность технологических операций, параметры техпроцессов и применяемое производственное оборудование – всё это им потребуется, когда они будут самостоятельно формировать технологический процесс производства МЭМС-акселерометра и запускать технологические операции на оборудовании в виртуальной технологической зоне.

Модуль «Интерактив «Конструирование МЭМС»

Для понимания технологических процессов важно хорошо представлять конструкцию устройства, поэтому следующий интерактивный модуль – «Конструирование МЭМС».

Кликните в меню «Интерактив «Конструирование МЭМС» и начните конструирование МЭМС изделий.

Интерактивный модуль содержит цифровой конструктор для пяти МЭМС-устройств: кантилевер, акселерометр, гироскоп, микрозеркало, микроклапан каждый из которых состоит из двух частей, расположенных на расстоянии 5-10 мкм с подключенными электродами. Практически, это обкладки микроконденсатора. Одна из обкладок конденсатора закреплена неподвижно, другая – подвижная, с заранее рассчитанной массой.

МЭМС кантилевер, акселерометр и гироскоп представляют собой инерционные емкостные датчики. При ускорении МЭМС-устройства расстояние между подвижной и неподвижной обкладками изменяется, изменяется ёмкость и, соответственно, напряжение между обкладками. Таким способом измеряется ускорение объекта, к которому прикреплён МЭМС-датчик.

МЭМС микрозеркало и микроклапан представляют собой исполнительные микроустройства. При увеличении уровня напряжения на электродах возрастает сила притяжения между обкладками конденсатора и подвижная часть микроустройства притягивается к неподвижной. При уменьшении уровня напряжения сила притяжения ослабевает и за счёт упругости подвижная часть отдаляется от неподвижной. Таким образом, изменением уровня подаваемого напряжения управляется положение подвижной части микроустройства.

Сначала надо выбрать устройство. Рекомендуется начинать с наиболее простых устройств по конструкции и далее переходить к более сложным в последовательности: кантилевер, микроклапан, микрозеркало, акселерометр, гироскоп.

Далее рекомендуется выбрать из меню и запустить опцию «Модель». Ребятам будет полезно увидеть микроустройство в действии в режиме анимации. Здесь можно изложить принцип действия и область применения микроустройства.

На этом этапе и далее при работе с другими опциями меню ребятам рекомендуем вращать объёмное изображение изделий для просмотра с разных ракурсов, это повышает уровень восприятия и понимания учащимися формы и особенностей конструкции, в том числе частично собранного изделия. Это важно при моделировании технологических процессов в следующих модулях интерактивного комплекса.

Далее рекомендуется выбрать из меню и запустить опцию «Демо-версия». Ребятам будет полезно увидеть в режиме анимации весь процесс конструирования целиком. Так будет понятен каждый из шагов конструирования и последовательность действий при конструировании. Управляйте демо-версией кнопками «Запустить» и «Пауза».

Далее рекомендуется выбрать из меню и запустить опцию «Проект». Необходимо предоставить возможность каждому учащемуся управлять процессом сборки. При этом они могут останавливаться, задавать вопросы, возвращаться пошагово назад и двигаться пошагово вперёд. В итоге каждый учащийся должен подтвердить, что этот этап работы он освоил.

Далее переходим к тестированию полученных ребятами знаний и навыков, для чего надо выбрать из меню и запустить опцию «Собери сам». Учащиеся должны самостоятельно собрать изделие. При возникновении трудностей они могут возвращаться к опциям

«Модель», «Демоверсия», «Проект» и попробовать самостоятельно собрать изделие заново в опции «Собери сам» до положительного результата.

Для закрепления материала рекомендуется сформировать STL-модель по результатам сборки изделия в режиме «Собери сам». Далее изделие, при наличии технической возможности, распечатывается на 3D-принтере в габаритах 10-20 см и предоставляется учащимся для осмотра и сборки с последующей разборкой.

Модуль «Интерактив-обучение «Технологии МЭМС»

Модуль «Интерактив-обучение «Технологии МЭМС» предоставляет возможность учащимся отработать технологический процесс изготовления МЭМС микроустройств на примере изделия «Акселерометр». В технологический процесс введены шесть основных технологических операций, которые в рамках профориентационной программы в целом дают понимание о сути технологического процесса с допущениями об упрощении реальных технологических процессов на микроэлектронных производствах.

Перед запуском опции «Интерактив-обучение» учащимся рекомендуется просмотреть анимацию последовательного выполнения технологических операций, для этого надо выбрать опцию «Демоверсия» и в том же окне кликнуть команду «Запустить». Для остановки анимации или после её окончания надо кликнуть команду «Сбросить».

Учащиеся имеют возможность просмотреть выполнение технологических операций по шагам в интерактивном режиме для чего надо выбрать опцию «Техпроцесс». Управление переходом к последующей или предыдущей технологической операции осуществляется нажатием кнопок «Вперёд» или «Назад». Анимация технологической операции сопровождается выводом на экран параметров, которые учащимся необходимо усвоить для прохождения тестирования в следующем модуле «Интерактив-тестирование «Технология МЭМС».

В интерактивном режиме «Сделай сам» ребята имеют возможность проверить свои знания о последовательности операций. Задайте уровень сложности, затем выберите опцию «Сделай сам», кликните название заготовка «Пластина КНИ», затем выбирайте технологические операции в той же последовательности как в мультимедийном ролике, режимах «Демоверсия» и «Техпроцесс». В случае выбора неверной технологической операции появится сообщение «Ошибка», при этом предоставляется возможность следующей попытки.

Выберете опцию «Обучение». Учащиеся последовательно запускают анимации технологических операций: нанесение фоторезиста, экспонирование фоторезиста, удаление фоторезиста, травление верхнего слоя кремния, удаление остатков фоторезиста, трав-

ление изолятора. При этом ребята перед запуском очередной технологической операции должны ввести параметры технологических режимов выполнения этой операции.

Введение параметров разбито **на четыре уровня сложности**. Ниже приведены описания работы по каждому из четырёх уровней сложности.

Второй уровень сложности требует введения параметров технологических режимов и выбора материалов для процессов, источником информации о которых является исключительно мультимедийное пособие первого модуля нашего интерактивного комплекса. При работе на первом уровне учащиеся используют знания, полученные при просмотре мультимедийного пособия. В случае затруднений ребята могут запустить ещё раз мультимедийное пособие и, в качестве повтора пройденного материала, взять нужный параметр технологического режима или наименования применяемых материалов для ввода параметров текущей технологической операции. Дополнительно учащиеся должны ввести параметры по результатам выполнения заданий.

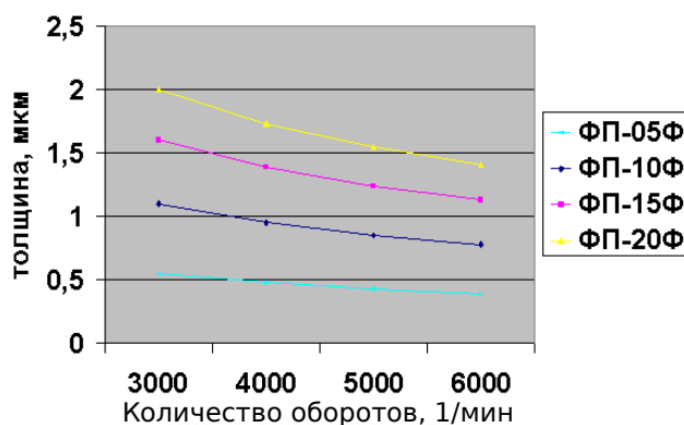
- 1) Для технологической операции «Нанесение фоторезиста» параметры для ввода формируются по результатам выполнения задания:

Задание №1. Для технологической операции «Нанесение фоторезиста» параметры для ввода формируются по результатам выполнения задания:

Определите кинематическую вязкость фоторезиста на пластине КНИ для получения толщины нанесённого слоя фоторезиста 1,5 мкм при заданном количестве оборотов в минуту центрифуги технологической установки нанесения фоторезиста 3000 об/мин. Температура в рабочей камере установки 20°C, температура фоторезиста 20°C, время центрифугирования 40 сек.

На рисунке 1 показана зависимость толщины плёнки от числа оборотов центрифуги и марки фоторезиста. Обозначение ФП-ххФ: ФП-фоторезист позитивный – хх кинематическая вязкость в сСт (мм²/сек) Ф-тип фоторезиста.

**Зависимость толщины пленки
от числа оборотов**



Для успешного решения задания необходимо разъяснить учащимся физический процесс распределения по поверхности пластины, направление силы тяжести и центробежной силы, физический смысл зависимости толщины слоя от скорости и вязкости, единицы измерения вязкости сСт.

Приводим решение задания

Решение: Из диаграммы для значений числа оборотов 3000 об/мин и толщины фоторезиста 1,5 мкм определяется марка фоторезиста ПФ-15Ф, которая имеет кинематическую вязкость 15 сСт (мм²/сек).

Таким образом, для технологической операции «Нанесение фоторезиста» на втором уровне учащийся вводит параметры:

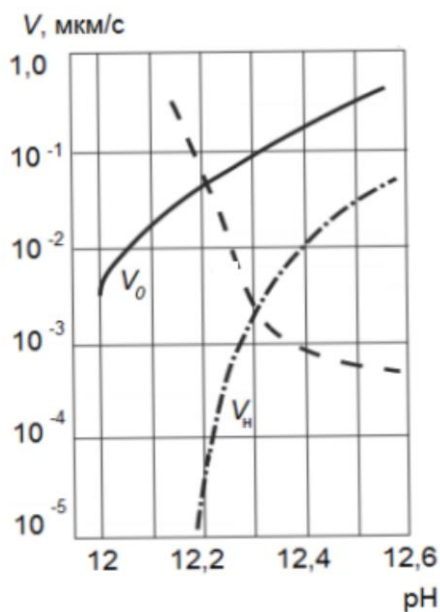
1. Толщина слоя фоторезиста 1,5 мкм (из условия задания).
2. Количество оборотов центрифуги 3000 об/мин, (из условия задания).
3. Кинематическая вязкость 15 сСт (по результатам выполнения задания).

2) Для технологической операции «Удаление фоторезиста» параметры для ввода формируются по результатам выполнения задания:

Для технологической операции «Удаление фоторезиста» параметры для ввода формируются по результатам выполнения задания:

Определите время удаления фоторезиста при заданной кислотности раствора $\text{pH} = 12,2$ для удаления фоторезиста и толщине нанесённого слоя фоторезиста 1,5 мкм. Температура раствора 45°C. Ответ округлить до целых.

На рисунке 2 приведён график зависимости скорости удаления фоторезиста от pH . Обозначения: V_0 – засвеченный фоторезист, V_H – незасвеченный фоторезист.



Для успешного выполнения задания следует разъяснить учащимся, почему повышение уровня pH влияет на скорость удаления фоторезиста.

Приводим решение задания

Решение: Фоторезист засвечен при выполнении предыдущей операции «Экспонирование фоторезиста, поэтому выбираем V_0 – засвеченный фоторезист. Скорость удаления фоторезиста для $pH = 12,2$ определяется из графика и равна $v \approx 0,06$ мкм/с. Толщина слоя фоторезиста равна $h = 1,5$ мкм, время определяется по формуле $t \approx h/v \approx 1,5/0,06 \approx 25$ сек.

Таким образом, для технологической операции «Удаление фоторезиста» на втором уровне учащийся вводит параметры:

1. Кислотность раствора pH 12,2 (из условия задания).
2. Тип раствора щелочной (из мультимедийного пособия).
3. Скорость удаления фоторезиста $\approx 0,06$ мкм (по результатам выполнения задания).
4. Время удаления ≈ 25 сек (по результатам выполнения задания).

При использовании графиков здесь и далее учащиеся вводят параметры технологической операции, рассчитанные на основе определяемых по графику значений с погрешностью. Поэтому в таблицах указан диапазон допустимых значений параметров для ввода при работе с модулем «Интерактив-обучение «Технологии МЭМС»

Параметры для ввода на втором уровне сложности приведены в таблице 2.

Таблица 2. Данные с информацией о параметрах технологических операций и наименованиях применяемых материалов на втором уровне сложности

№ технологической операции	Процесс	Параметр	Значения параметров
-	Задания параметров «Структура кремний на изоляторе»	Нижний слой кремния, мкм <i>Ролик, 2:25 *</i>	500
		Диоксид кремния, мкм <i>Ролик, 2:25</i>	1,3
		Верхний слой кремния, мкм <i>Ролик, 2:25</i>	15 - 20
1	Технологическая операция «Нанесение фоторезиста»	Кол-во оборотов центрифуги, об/мин	3000
		Кинематическая вязкость, сСт	14 - 19
		Толщина слоя фоторезиста, мкм <i>Ролик, 2:43</i>	1,5
2	Технологическая операция «Экспонирование фоторезиста»	Тип облучения при экспонировании <i>Ролик, 3:20</i>	Ультрафиолетовое
3	Технологическая операция «Удаление фоторезиста»	Кислотность раствора, pH	12,2
		Скорость удаления, мкм/с	0,02-0,08

		Время удаления, с	20-30
		Тип раствора для удаления фоторезиста <i>Ролик, 4:05</i>	Щелочной
4	Технологическая операция «Реактивное ионное травление кремния»	Вещество в составе химически активных частиц <i>Ролик, 4:27</i>	Фтор
5	Технологическая операция «Удаление остатков фоторезиста»	В составе раствора для удаления остатков фоторезиста <i>Ролик, 4:27</i>	Пероксид водорода
6	Технологическая операция «Изотропное травление изолятора»	Молекулы активного вещества изотропного травления <i>Ролик, 5:54</i>	Фтористый водород

**) ссылка на мультимедийное пособие, мин:сек*

Модуль «Интерактив-тестирование «Технологии МЭМС»

Кликните в меню цифровой интерактивной лаборатории «Интерактив-тестирование «Технологии МЭМС» и начните тестировать полученные знания и навыки по моделированию технологических процессов МЭМС изделий.

В модуле «Интерактив-тестирование «Технологии МЭМС» учащиеся сначала вводят параметры заготовки со структурой «кремний на изоляторе», при этом по окончании успешного ввода данных запускается анимация с визуализацией структуры «кремний на изоляторе», затем учащиеся вводят данные с информацией о параметрах технологических операций и наименованиях применяемых материалов, при этом по окончании успешного ввода данных для текущей технологической операции запускается анимация процесса этой технологической операции.

В случае ошибочного ввода параметров технологической операции появляется сообщение об ошибке и предоставляется следующая попытка. После трёх неудачных попыток система прекращает работу с одновременным выходом из модуля «Модуль «Интерактив-тестирование «Технологии МЭМС»». Для возвращения в режим тестирования модуль необходимо запустить заново.

За выполненные задания назначаются баллы в соответствии с таблицей 6.

Таблица 6. Количество баллов за выполненные задания

№	Процесс	Уровень 2
0	Задания параметров «Структура кремний на изоляторе»	1

1	Технологическая операция «Нанесение фоторезиста»	2
2	Технологическая операция «Экспонирование фоторезиста»	1
3	Технологическая операция «Удаление фоторезиста»	2
4	Технологическая операция «Реактивное ионное травление кремния»	1
5	Технологическая операция «Удаление остатков фоторезиста»	1
6	Технологическая операция «Изотропное травление изолятора»	1
	ИТОГО	9

Модуль «Интерактив «VR изготовление МЭМС на производстве»

Для запуска модуля «Интерактив «VR-изготовление МЭМС на производстве»» нажмите на соответствующей кнопке, скачайте исполняемый файл MEMSLab-Setup.exe на персональный компьютер.

Запустите файл MEMSLab-Setup.exe. Выберите диск и папку для установки (рис. 1), следуйте указаниям Мастера Установки.

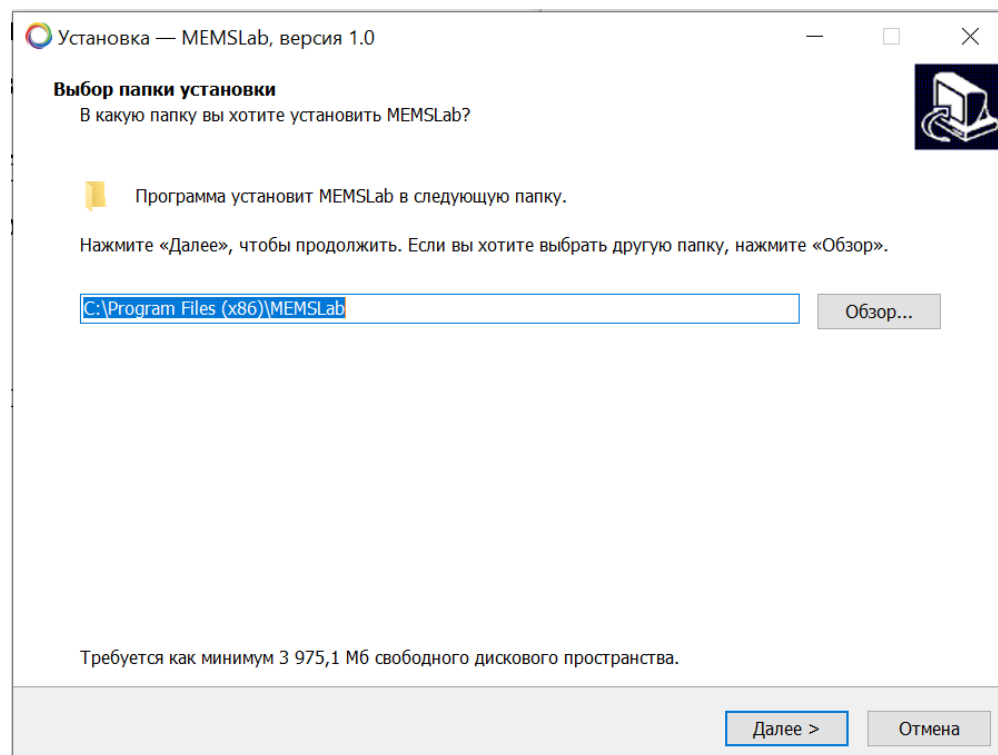


Рис. 1. Диалоговое окно установки

После установки на Рабочем столе Windows появляется Ярлык программы (рис. 2). Запуск программы осуществляется двойным щелчком мыши по ярлыку

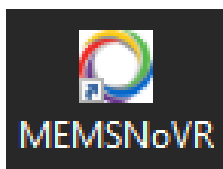


Рис. 2. Ярлык программы

При запуске загружается основное меню программы (рис. 3). При этом есть возможность переключаться между полноэкранным и оконным режимом отображения при помощи сочетания клавиш Alt+Enter.

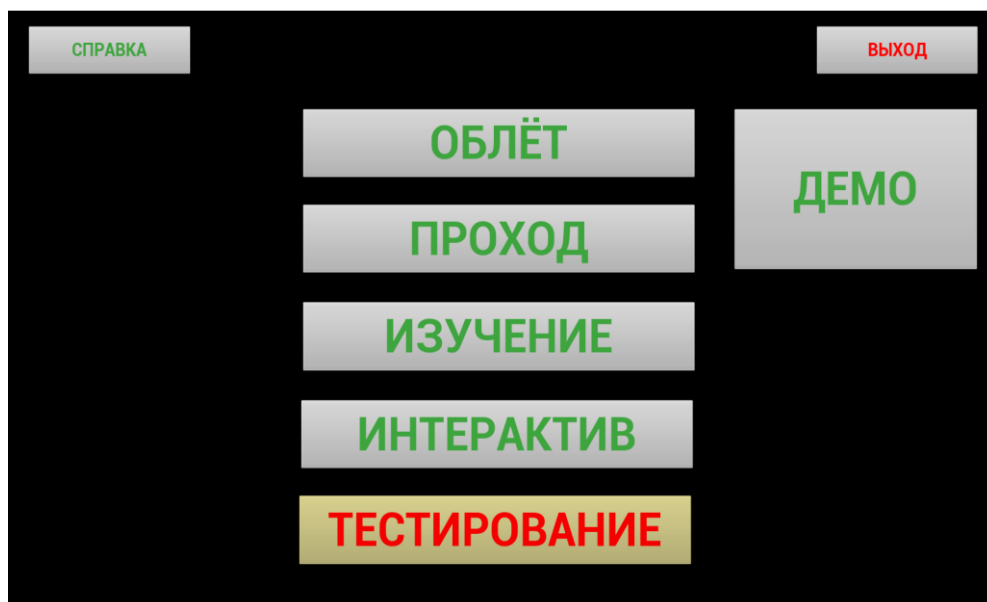


Рис. 3. Основное меню программы

Кнопка Справка – расположена в верхнем левом углу основного меню программы, вызывает окно справочной информации.

Кнопка Выход – расположена в верхнем правом углу основного меню программы, осуществляет выход из программы в Windows.

Кнопка Демо – включает режим демонстрации видеоролика с записанными действиями режимов Интерактив и Тестирование. Этот режим позволяет как просматривать ролик последовательно, так и переходить от фрагмента к фрагменту нажатием соответствующих кнопок. Имеется возможность сделать паузу.

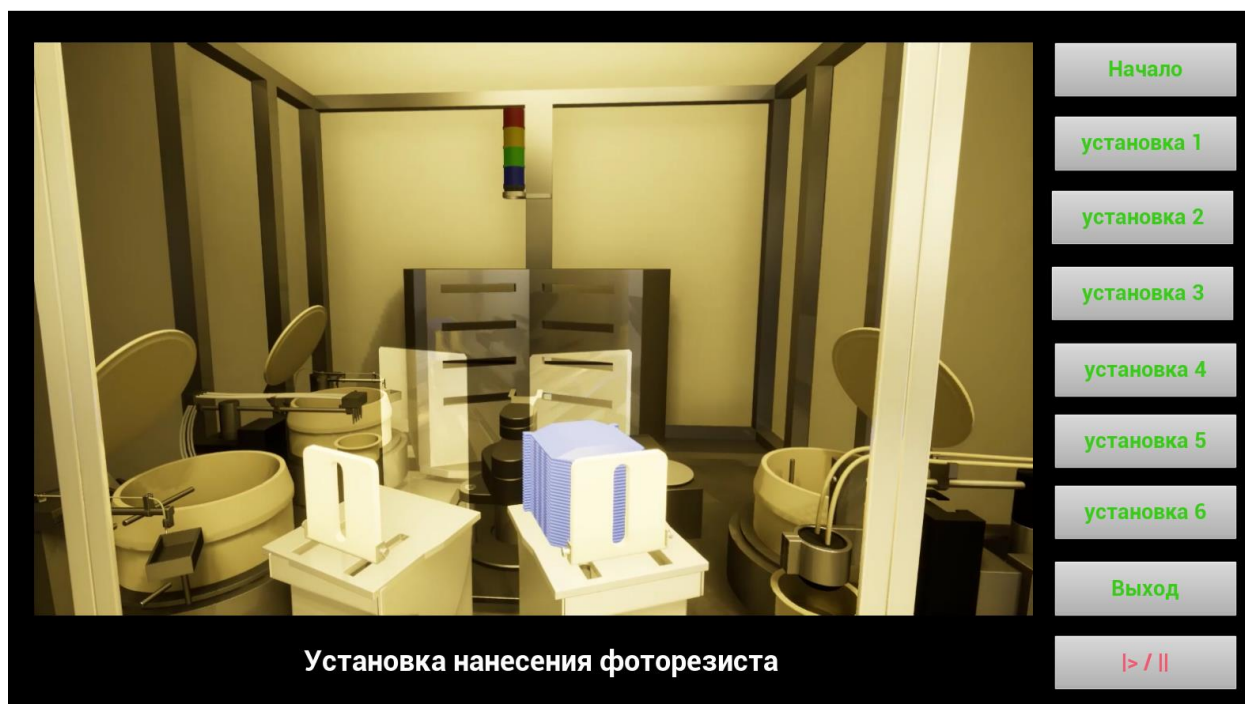


Рис. 4. Вид рабочего экрана в режиме Демо

Кнопка **Облёт** – включает режим самостоятельного ознакомительного последовательного облета производственной зоны. Показано расположение сверху производственных технологических участков с оборудованием. Предоставляется возможность ограниченного интерактива: управление продвижением по маршруту технологических операций от одной установки к другой, на шаг вперед и возвращение по маршруту на шаг назад. Траектория технологического маршрута обозначена маркерными стрелками. Пример рабочего экрана показан на рис. 5.

В режиме **Облёт** управление осуществляется следующим образом:

- клавиши **A**, **Пробел**, левая кнопка мыши – управляют перемещением к следующей технологической установке;
- клавиши **B**, **Backspace**, правая кнопка мыши – управляют перемещением к предыдущей технологической установке;
- мышь управляет поворотом камеры, изменяя направление взгляда;
- клавиша **Esc** загружает меню выхода в основное меню, содержащее два пункта – **Выход** и **Отмена**;
- сочетание клавиш **Ctrl+R** осуществляет перезапуск текущего режима программы.

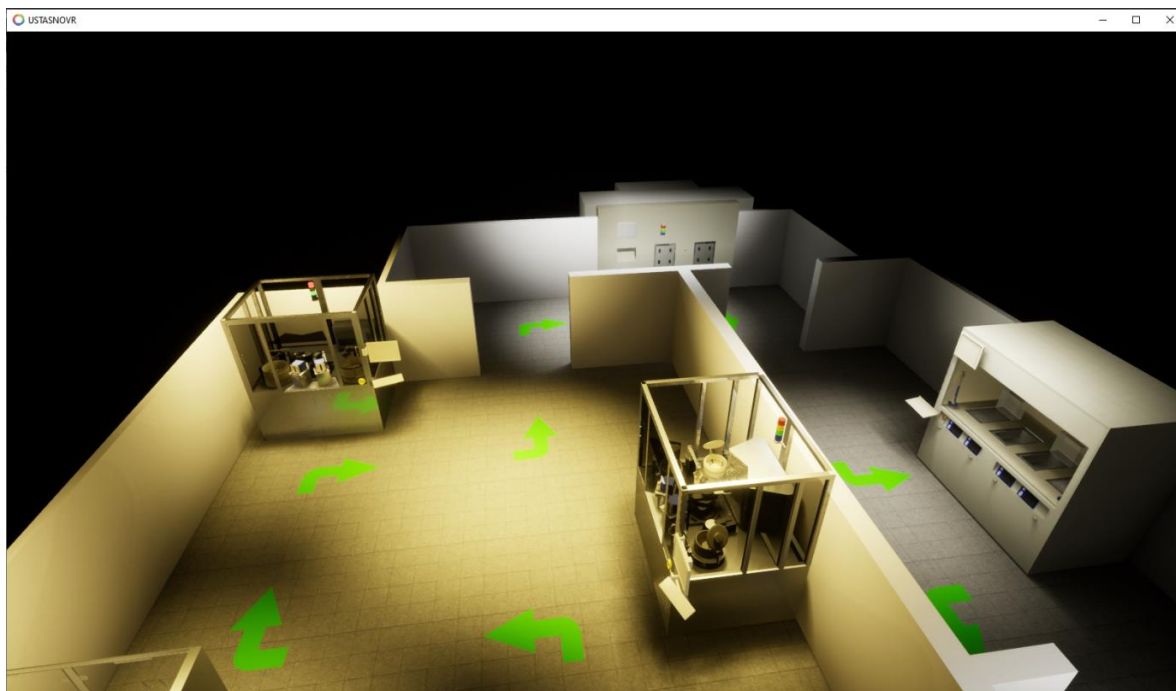


Рис. 5. Вид рабочего экрана в режиме Облёт

Кнопка Проход – включает режим самостоятельного ознакомительного прохода обучающегося в чистых комнатах по произвольному маршруту в режиме с ограниченным интерактивом. Траектория технологического маршрута обозначена маркерными стрелками, указаны названия установок и технологических процессов. В этом режиме осуществляется закрепление знаний о назначении производственных участков и технологического оборудования (рис. 6).



Рис. 6. Вид рабочего экрана в режиме Проход

В режиме Проход управление осуществляется следующим образом:

- клавиши W, Стрелка вверх, клавиша 8 на цифровой клавиатуре (при отключенном режиме NumLock) – управляют перемещением вперед;
- клавиши S, Стрелка вниз, клавиша 2 на цифровой клавиатуре (при отключенном режиме NumLock) – управляют перемещением назад;
- перемещение мыши влево и вправо – осуществляет поворот камеры, изменяя направление взгляда в соответствующем направлении;
- левая или правая кнопка мыши, клавиши Пробел и Enter – воспроизводят действие, если оно разрешено в данный момент. Такая возможность появляется в момент попадания в зону активности. При этом появляется модель руки и воспроизводится анимация;
- клавиши A и D – осуществляют перемещение влево и вправо соответственно;
- клавиши Стрелка влево, 4 на цифровой клавиатуре (при отключенном режиме NumLock) – управляют поворотом налево.
- клавиши Стрелка вправо, 6 на цифровой клавиатуре (при отключенном режиме NumLock) – управляют поворотом направо.
- клавиша Esc загружает меню выхода в основное меню, содержащее два пункта – Выход и Отмена;
- сочетание клавиш Ctrl+R осуществляет перезапуск режима программы.

Для входа в чистые комнаты, необходимо «переодеться» в специальный костюм. Для этого необходимо подойти к стеллажу. При появлении «руки» следует навести ее на оранжевый костюм и нажать левую или правую кнопку мыши (рис. 7).



Рис.7. Вид рабочего экрана в режиме выбора специального костюма

Если костюм исчезнет, значит пользователь успешно «переоделся» и может зайти в производственные помещения. Для чего необходимо нажать на кнопку Вход и дверь откроется (рис. 8).

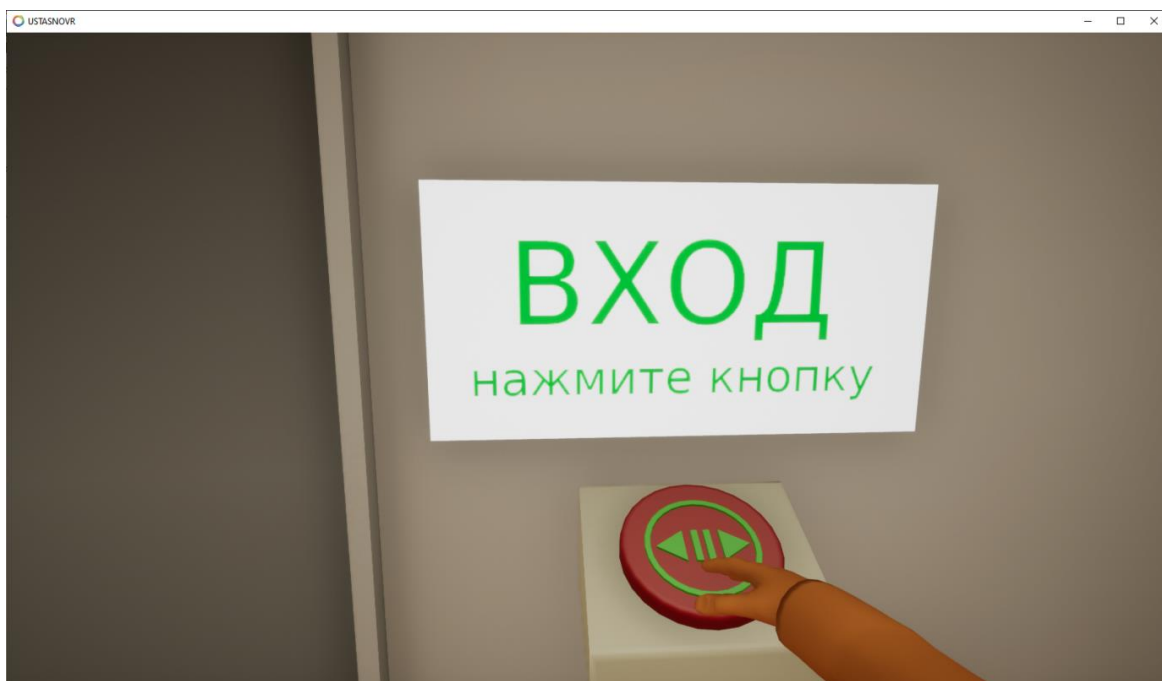


Рис. 8. Вид рабочего экрана Интерактивной VR-лаборатории в режиме Вход

Для выхода необходимо произвести обратную операцию: подойти к пустому стеллажу и «снять» костюм. После этого можно нажать кнопку Выход (рис. 9).

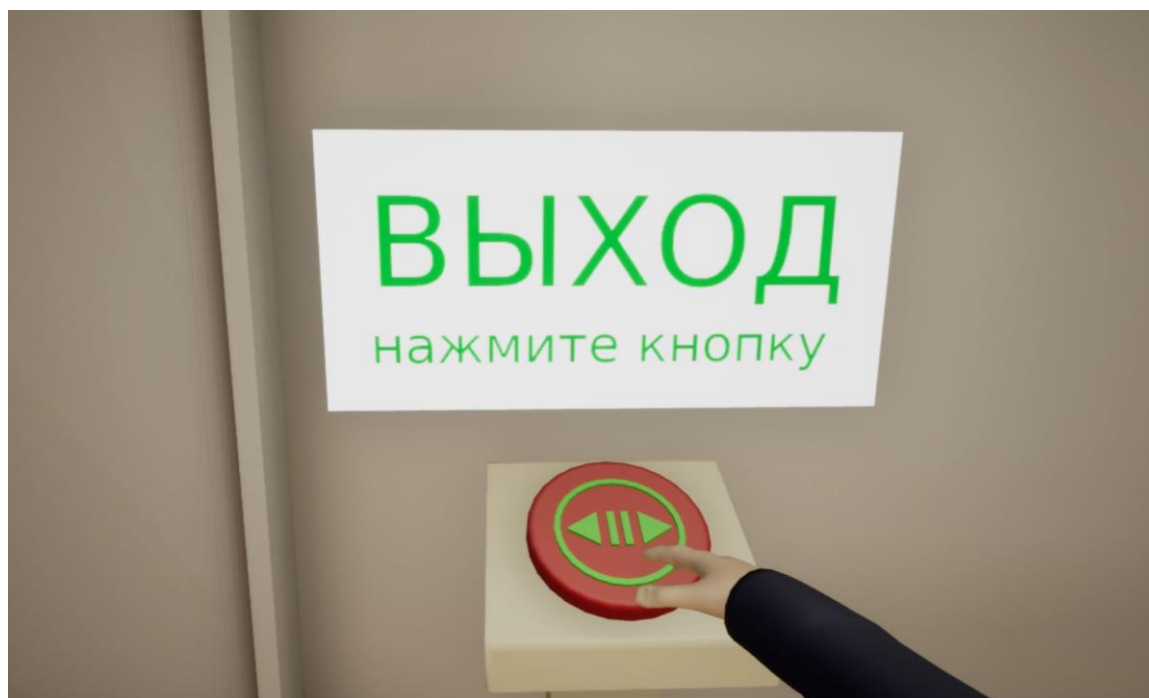


Рис. 9. Вид рабочего экрана в режиме Выход

Кнопка **Изучение** – включает режим самостоятельного прохода обучающегося в чистых комнатах по произвольному маршруту с возможностью просмотра на специальных экранах анимационных роликов о технологических операциях и устройствах. Также технологические установки могут, по команде пользователя, демонстрироваться без корпусов, с детализацией и анимацией основных элементов и операций. Траектория технологического маршрута обозначена маркерными стрелками, указаны названия установок и технологических процессов. В этом режиме осуществляется закрепление знаний о назначении производственных участков и технологического оборудования.

Обход в режиме **Изучение** может осуществляться в произвольном порядке. Управление программой осуществляется аналогично режиму **Обход**.

В момент попадания в зону активности появляется возможность интерактивного нажатия кнопок «рукой». Для этого необходимо щелкнуть левой или правой кнопкой мыши (рис. 10).

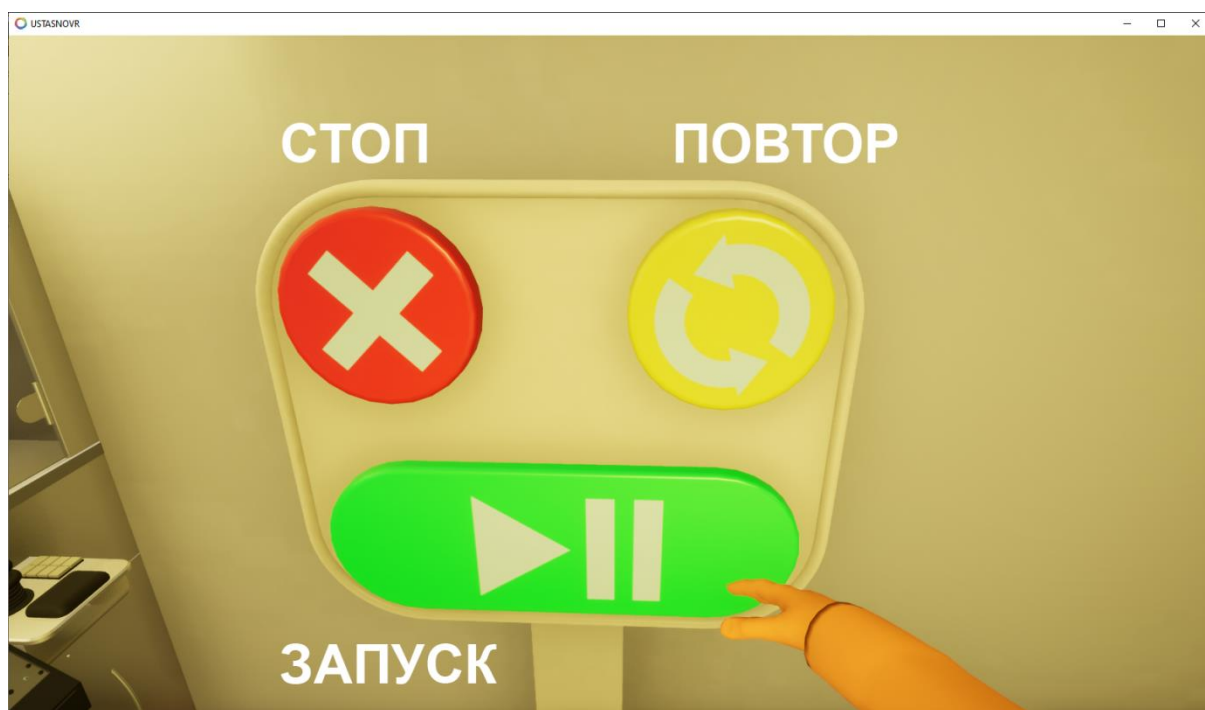


Рис. 10. Интерактивное управление кнопками «рукой»

Кнопка **Запуск** – осуществляет демонстрацию анимационного ролика о технологических операциях и устройствах на специальном экране, а также демонстрацию технологических установок без корпусов с детализацией и анимацией основных элементов и операций (рис. 11). Воспроизведение организовано циклично. Повтор - запускает анимацию сначала.

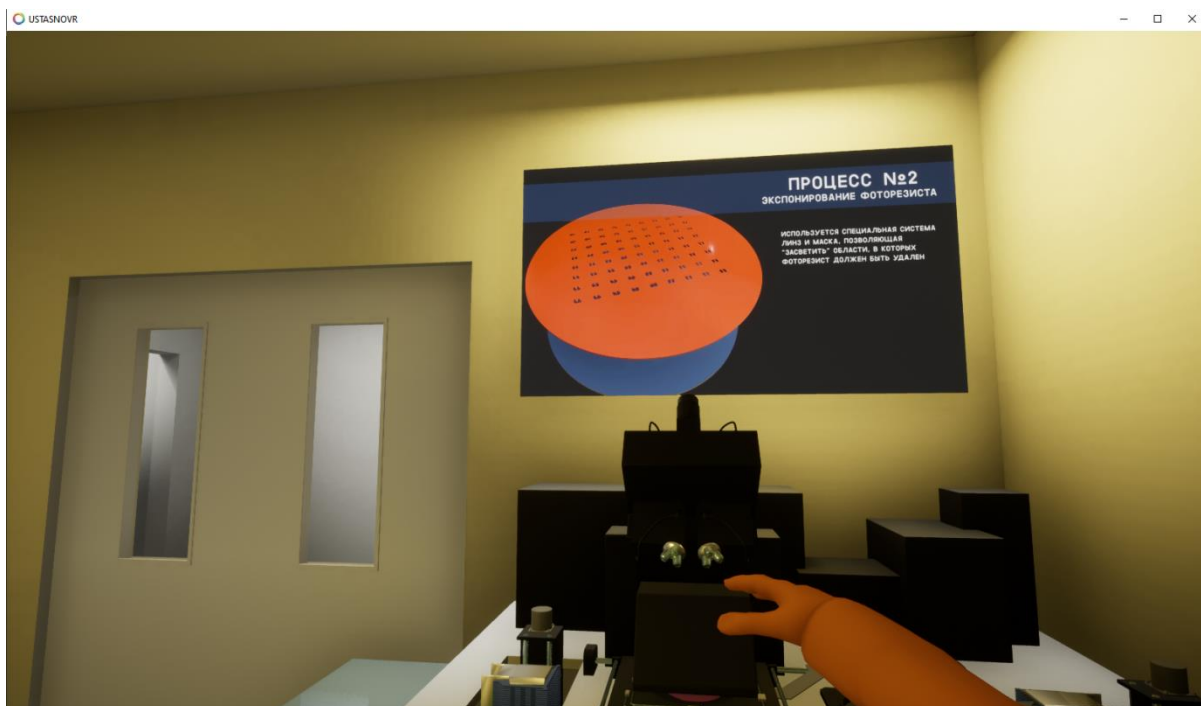


Рис. 11. Демонстрация анимационного ролика и установки без корпуса

Кнопка Стоп – прерывает процесс анимации и переводит установку в исходное состояние.

Кнопка Интерактив – устанавливает режим, в котором добавляется возможность самостоятельной загрузки кассет с пластинами в рабочую зону установки. Обход осуществляется последовательно, кассеты загружаются в необходимые приемные емкости (загрузчики) установок. В данном режиме обучающийся должен продемонстрировать знания последовательности выполнения технологических операций, назначения установок и порядка загрузки кассет: кассеты должны быть перенесены со столика или из предыдущей установки, и установлены в соответствующие рабочие зоны следующих установок в соответствии с порядком технологического процесса (рис. 12).

Управление программой в режиме Интерактив осуществляется аналогично режиму Изучение.



Рис. 12. Загрузка кассет с пластинами в рабочую зону установки

После загрузки кассет в рабочую зону установки, обучающийся должен запустить установку нажатием соответствующей кнопки на стенде. В случае, если все сделано верно – звучит сигнал высокой тональности, загорается зеленый сигнал и установка начинает работу в автоматическом режиме. В случае ошибки – звучит сигнал низкой тональности и загорается красный сигнал (рис. 13). Обучающийся должен понять в чем заключается ошибка и исправить ее. Кассеты не обязательно устанавливать точно, при запуске анимации они автоматически выравниваются.

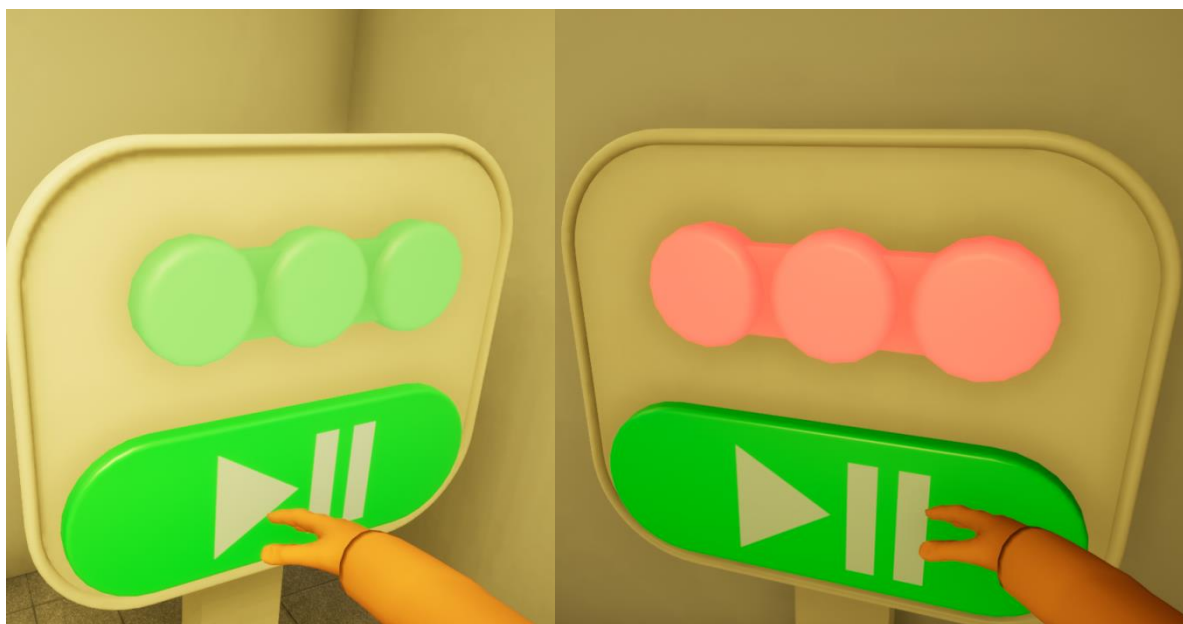


Рис. 13. Запуск технологического процесса на установке

Кнопка Тестирование – устанавливает режим, аналогичный режиму Интерактив. Для тестирования знаний обучающегося в данном режиме добавляется счетчик успешных и неудачных попыток выполнения технологических операций (рис. 14).



Рис. 14. Вид рабочего экрана в режиме Тестирование